



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA FINCA LA CONCHA, UBICADA EN LA
ALDEA EL JOCOTILLO, VILLA CANALES, GUATEMALA**

Luis Gerardo Sierra Sandoval

Asesorado por el MSc. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Guatemala, junio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA FINCA LA CONCHA, UBICADA EN LA
ALDEA EL JOCOTILLO, VILLA CANALES, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

LUIS GERARDO SIERRA SANDOVAL

ASESORADO POR EL ING. MSc. WALTER ARNOLDO BARDALES ESPINOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL I | |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Narda Lucía Pacay Barrientos |
| VOCAL V | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Roberto Mayorga Rouge |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| EXAMINADOR | Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra |
| EXAMINADOR | Ing. Gustavo Benigno Orozco |
| SECRETARIO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA FINCA LA CONCHA, UBICADA EN LA ALDEA EL JOCOTILLO, VILLA CANALES, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado de Ingeniería, con fecha 10 de abril de 2015.

Luis Gerardo Sierra Sandoval



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



000097

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

ADSE-MEAPP-004-2015

Guatemala, 10 de abril de 2015.

Director:
Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de **Ingeniería Mecánica Eléctrica**
Presente.

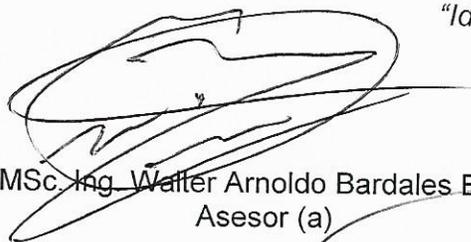
Estimado Director:

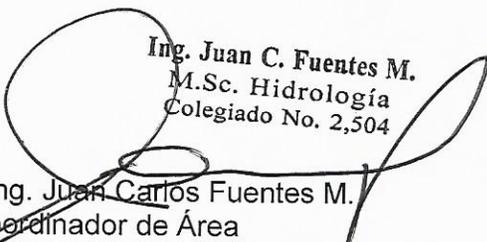
Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Luis Gerardo Sierra Sandoval** carné número **86-10624**, quien opto la modalidad del **“PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO”**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

“Id y enseñad a todos”


MSc. Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
Asesor (a)


Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504
MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético



M.Sc. Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
Maestro en Recursos Hidráulicos Opción Hidrología
Ingeniero Agrónomo
Colegiado 4279

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
/la



REF. EIME 107.2015.
Guatemala, 1 de junio 2015.

FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA FINCA LA CONCHA, UBICADA EN LA ALDEA EL JOCOTILLO, VILLA CANALES, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Gerardo Sierra Sandoval**, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA FINCA LA CONCHA, UBICADA EN LA ALDEA EL JOCOTILLO, VILLA CANALES, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Gerardo Sierra Sandoval**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Angel Roberto Sic García
Decano

Guatemala, junio de 2015

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|---------------------------------|--|
| Dios | Por ser mi guía en todo momento. |
| En memoria de mis padres | Juan José Sierra y Dora Alicia Sandoval de Sierra, por su amor incondicional. |
| Mi esposa | María Meneses de Sierra, por ser mi compañera en la vida, quien me ha brindado amor, comprensión y motivación en todo momento. |
| Mis hijos | Luis Antonio, Francisco José y Fátima Sierra Meneses, por ser la felicidad de mi vida. |
| Mis hermanos | Juan Carlos y Juan José Sierra Sandoval, por el apoyo incondicional. |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|---|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser la casa de estudios que me formó como profesional. |
| Facultad de Ingeniería | Por acogerme en sus aulas. |
| Señor Edgar Nanne | Por brindarme la oportunidad de desarrollar la investigación y ser un gran amigo. |
| Señor Carlos Castejón | Por la colaboración prestada a lo largo de estos años. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| RESUMEN..... | VII |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 7 |
| 4. JUSTIFICACIÓN | 11 |
| 5. OBJETIVOS | 13 |
| 6. ALCANCES..... | 15 |
| 7. MARCO TEÓRICO..... | 17 |
| 7.1. El viento: origen y su potencial | 17 |
| 7.1.1. Origen | 17 |
| 7.1.2. Potencial del viento..... | 21 |
| 7.1.3. Límite de Betz..... | 23 |
| 7.1.4. Medición del viento | 25 |
| 7.1.5. Variación del viento con la altura | 26 |
| 7.1.6. Densidad del aire | 30 |
| 7.2. Análisis estadístico del clima eólico..... | 31 |
| 7.2.1. Distribuciones temporales | 31 |

| | | |
|--------|---|----|
| 7.2.2. | Distribuciones de frecuencia | 33 |
| 7.2.3. | Función de Weibull..... | 35 |
| 7.3. | Método probabilístico para determinar la energía obtenida | 39 |
| 7.4. | Impacto ambiental de la energía eólica..... | 42 |
| 8. | PROPUESTA DE ÍNDICE GENERAL..... | 43 |
| 9. | METODOLOGÍA | 45 |
| 9.1. | Etapa 1: investigación preliminar | 45 |
| 9.1.1. | Investigación bibliográfica | 45 |
| 9.1.2. | Reconocimiento del emplazamiento..... | 45 |
| 9.1.3. | Caracterización del sitio de estudio..... | 46 |
| 9.2. | Etapa 2: recolección de datos | 46 |
| 9.2.1. | Definición de variables, equipo y unidades de medición | 46 |
| 9.2.2. | Procedimiento de toma de datos..... | 47 |
| 9.3. | Etapa 3: análisis estadístico..... | 48 |
| 9.3.1. | Ordenamiento y graficación de datos..... | 48 |
| 9.3.2. | Datos del viento..... | 48 |
| 9.3.3. | Datos de dirección del viento | 50 |
| 9.3.4. | Densidad del aire | 51 |
| 9.3.5. | Densidad de potencia meteorológica | 51 |
| 9.3.6. | Perfil vertical de la velocidad del viento..... | 52 |
| 9.4. | Etapa 4: generación del modelo estocástico..... | 52 |
| 9.4.1. | Cálculo de los parámetros de la función de Weibull..... | 53 |
| 9.4.2. | Generación de la curva de Weibull..... | 53 |
| 9.4.3. | Técnicas de análisis de la información | 53 |

| | | |
|---------|--|----|
| 10. | CRONOGRAMA..... | 55 |
| 11. | RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO | 57 |
| 11.1. | Recursos humanos..... | 57 |
| 11.2. | Recursos materiales..... | 57 |
| 11.2.1. | Equipo físico | 57 |
| 11.2.2. | Equipo de software | 58 |
| 11.3. | Equipos varios | 58 |
| 11.3.1. | Recursos financieros | 58 |
| 11.4. | Factibilidad del estudio | 59 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 61 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Modelo básico del movimiento global del viento | 18 |
| 2. | Modelo ampliado del origen del viento | 19 |
| 3. | Comportamiento del viento a través de un rotor | 23 |
| 4. | Variación del viento con la altura | 27 |
| 5. | Comportamiento del viento ante los obstáculos..... | 29 |
| 6. | Registro diario de la velocidad del viento..... | 32 |
| 7. | Densidad de probabilidad teórica y experimental..... | 33 |
| 8. | Frecuencia acumulada teórica y experimental | 34 |
| 9. | Rosa de los vientos..... | 34 |
| 10. | Curva de potencia y densidad de probabilidad del viento | 40 |

TABLAS

| | | |
|------|--|----|
| I. | Valores de β y z_0 para diferentes terrenos..... | 28 |
| II. | Variables a registrar | 47 |
| III. | Formato para ingresar los datos de la torre 80 m, La Concha | 48 |
| IV. | Formato para ingresar la estadística mensual de velocidad del viento (metros por segundo) | 49 |
| V. | Formato para ingresar la distribución de frecuencias de velocidad de viento..... | 49 |
| VI. | Formato para ingresar la dirección del viento (grados rosa de los vientos)..... | 50 |
| VII. | Formato para ingresar la distribución de frecuencia de dirección del viento..... | 50 |

| | | |
|-------|--|----|
| VIII. | Formato para ingresar la densidad del aire mensual | 51 |
| IX. | Formato para ingresar la densidad de potencia meteorológica | 51 |
| X. | Formato para ingresar el perfil vertical de la velocidad del viento..... | 52 |
| XI. | Formato para ingresar los parámetros k y c de Weibull | 53 |
| XII. | Cronograma de actividades | 55 |
| XIII. | Resumen de los gastos presupuestados por el investigador | 58 |

RESUMEN

El presente estudio tiene por objeto evaluar el recurso eólico en el sitio de la finca La Concha y llegar a determinar si es viable técnicamente el desarrollo de un parque eólico para la generación de energía eléctrica.

El desarrollo de la investigación inicia con el marco teórico en el capítulo 1, donde se revisan las leyes físicas que describen el comportamiento del viento. El capítulo 2 plantea la metodología que guiará la investigación, partiendo de las variables a medir, pasando la recolección y análisis estadístico de datos llegando a determinar el modelo estocástico del sitio.

Los resultados se presentan en el capítulo 3, y se discuten en el capítulo 4. En el capítulo 5 se determina la viabilidad del proyecto con base en la información obtenida.

1. INTRODUCCIÓN

Los fenicios fueron la primera civilización que aprovechó la energía del viento, al emplearlo en sus barcos. No fue sino hasta el siglo XIX, que los barcos de vela son sustituidos por barcos de vapor (Moragues J. R., 2003, p. 3).

También, esta fuente de energía es aprovechada a partir del Renacimiento para moler granos con los llamados molinos de viento. En años recientes, únicamente se ha mejorado la eficiencia de las turbinas o aspas, incorporando un generador eléctrico en lugar de un molino de grano (Carta, 2009, p. 332).

Las corrientes de viento tienen su origen en el calentamiento provocado por la energía del sol que llega a la superficie de la tierra y eleva la temperatura del aire en la atmósfera. Esto provoca que grandes masas de aire se desplacen de las zonas polares a las más cálidas, debido a que el aire con mayor temperatura es más liviano y sube a estratos más altos en la atmósfera, siendo el aire frío el que ocupa el espacio dejado por el aire caliente según la teoría de gases, generando el fenómeno a nivel planetario. Además, esto causa el cambio de temperatura a nivel local en las costas continentales, ya que el aire se calienta más rápidamente sobre la tierra que sobre los océanos, al igual que en los valles y montañas. “La proporción de la energía solar que se transforma en viento es de 0,18 %” (Carta, 2009, p. 47).

“La energía eólica almacenada en los vientos en todo el mundo se estima entre 2 500 y 5 000 TWh (tera-watts hora) de los cuales es recuperable entre el 1 y 2 %” (Carta, 2009). Para Guatemala, las reservas del recurso eólico están estimadas en 7,00 MW (Koberle, 2012, p. 54).

El recurso eólico como fuente de energía renovable limpia es el de mayor crecimiento en las últimas décadas (Greenpeace, 2012, p. 3); sin embargo, en Guatemala es poco aprovechado hasta el momento, debido a la alta inversión requerida para la investigación del comportamiento del clima eólico en los sitios con potencial. Por otra parte, este recurso tiene algunos inconvenientes, tales como su intensidad variable y poco predecible.

El presente estudio pretende evaluar el recurso eólico en el sitio propuesto, con el objeto de determinar la viabilidad técnica de la generación eléctrica por medio de turbinas eólicas.

2. ANTECEDENTES

Siendo la energía eólica una fuente renovable que presenta una alternativa al uso de hidrocarburos y por su característica aleatoria, ha sido necesaria la investigación que permita generar el conocimiento para una explotación exitosa del recurso viento. La investigación se ha centrado en técnicas de observación meteorológica, análisis estadístico y desarrollo de programas de predicción.

En la tesis *Reconstrucción del campo de viento para la generación de mapas de potencial eólico a lo largo de la costa del Estado de Tamaulipas, México*, se hace el análisis de las condiciones del viento por medio de información satelital, para la obtención del potencial eólico y caracterización del viento superficial en la región de estudio. Presenta una metodología que puede ser aplicada en otras zonas de interés (Carrasco, 2012).

En la tesis doctoral *Caracterización del régimen de vientos y desarrollo de un modelo de predicción eólica a escala local en el estrecho de Gibraltar, Palomares* caracteriza los regímenes de vientos con base en datos obtenidos en un grupo de estaciones ubicadas en toda el área del estrecho. Determina, con base en series anuales, curvas de velocidad y ajuste a curvas teóricas de Weibull, y elabora un modelo de predicción del potencial eólico en el área (Palomares, 2004).

En la tesis *Estudio de Flujo Eólico para producción de energía eoloeléctrica*, se hace la caracterización del viento de un sitio por medio de la toma de lecturas de velocidad de viento durante un corto período y luego se

hace una correlación con los datos de estaciones meteorológicas que cuentan con datos de períodos mayores (Galicia, 2012).

En el artículo *Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México* publicado por la revista *Dyna*, el estudio se enfoca en el mapeo de la región por medio de 16 estaciones anemométricas a 50 metros de altura (Hernandez, 2012).

En el artículo *Evaluación del recurso eólico del departamento confluencia de la provincia del Neuquen*, por medio de información satelital y programas de modelamiento atmosférico se detectan los sitios más propicios para futuros parques eólicos en la región (Warchomicka, 2005).

En la tesis *Modelación y evaluación del potencial eólico como una fuente de generación de energía eléctrica en la zona costera de Cartagena*, se hace la evaluación y modelación de las características del viento por medio de estaciones del Instituto de Meteorología Nacional de Colombia con las cuales se hace una correlación a los sitios de mayor potencial (Tafur, 2013).

En Guatemala, desde el 2003, está vigente la ley que estimula el aprovechamiento de las energías renovables como mecanismo para alcanzar cierto grado de independencia respecto de la generación de electricidad por medios de combustibles fósiles (Congreso de la República de Guatemala, 2003).

Actualmente, están en etapa de ejecución dos proyectos para la generación de energía eléctrica de forma eólica, los cuales son:

- San Antonio El Sitio, el cual tendrá una capacidad instalada de 52,8 MW, estará ubicado en el municipio de Santa Elena Barillas,

Guatemala y se estima que entrará en operación en mayo del 2015 (Alonzo, 2013, p. 1).

- Viento Blanco, el cual tendrá una capacidad instalada de 21 MW, estará ubicado en el municipio de San Vicente Pacaya, Escuintla, hasta el momento no se conoce la fecha de puesta en operación.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala, mucha de la población aún está en una etapa incipiente en cuanto al manejo de las fuentes de energía. Según lo expuesto en el informe *Balance Energético 2010* del Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala, la principal fuente de energía es la leña, la cual representa el 58,2 %; el 33 % corresponde a combustibles fósiles y la energía eléctrica representa el 8,8 %¹ (Guatemala, 2010, p. 6). De estos datos, llama la atención el alto valor que corresponde a la leña y su uso básicamente residencial, siendo la energía eléctrica la que debería ocupar un alto porcentaje en este sector.

Actualmente, la generación eléctrica del país depende en 33,58 % de los combustibles fósiles (CNEE, 2013, p. 12). A nivel mundial, la generación eléctrica con combustibles fósiles representa el 80 % (International Energy Agency, 2008, p. 62), por lo que el país está en una posición ventajosa a nivel mundial, sin embargo este valor debe sostenerse o disminuir conforme se incrementa la demanda de electricidad.

Según la proyección del crecimiento de la demanda de energía eléctrica, para el año 2022 se requerirán 3,928 GWh adicionales a los 9,642 GWh actuales (Ministerio de Energía y Minas, Gobierno de Guatemala, 2013, p. 2). Por lo que el Ministerio de Energía y Minas tiene como objetivo cubrir esta demanda energética estimulando la generación de electricidad por medio de energías renovables. La meta propuesta es del 60 % para el año 2022 (Ministerio de Energía y Minas, Gobierno de Guatemala, 2013, p. 1), ya en el

¹Las fuentes energéticas es posible compararlas por medio de la conversión a unidades de barriles equivalentes de petróleo (BEP).

presente año es del 65,3 % (Ministerio de Energía y Minas, Gobierno de Guatemala, 2013, p. 8). La matriz energética en este momento ya ha alcanzado el objetivo, pero debe ser sostenido en el período fijado, según el crecimiento de la demanda proyectado para el año 2022.

Por lo tanto, es necesario continuar con la incorporación de más fuentes de energía renovables a la matriz energética del país, siendo la generación por energía hidráulica, geotérmica, eólica y solar, las de mayor potencial en el país.

Tomando la iniciativa del Ministerio de Energía y Minas respecto a la generación con fuentes de energía renovables y a los incentivos propuestos, se plantea el estudio de la factibilidad técnica para desarrollar un parque de generación de electricidad aprovechando la energía eólica.

El propietario del terreno ubicado en la aldea El Jocotillo, está dispuesto a invertir en una planta de generación; ya que por observación de la vegetación, se tiene una estimación empírica de la dirección e intensidad del viento predominante en el lugar (Galicia, 2012, p. 40). También, el terreno ya posee algunas cualidades, en cuanto a ubicación respecto a las líneas del tendido eléctrico, acceso y topografía, que se perfilan apropiadas para un proyecto de esta naturaleza. Dichas cualidades deberán ser confirmadas en los estudios respectivos, siendo el factor más importante, la cuantificación del potencial eólico.

Por lo tanto es posible plantearse la pregunta principal: ¿Son las características del clima eólico en el sitio adecuadas para la viabilidad técnica del proyecto de generación eólico- eléctrica? Para dar respuesta a esta pregunta es necesario realizar otras preguntas secundarias que permitan conocer las características del viento tales como: ¿cómo es la distribución

temporal del viento en períodos semanal, mensual, anual?, ¿cuáles son los meses con mayor potencial energético?, ¿es posible generar un modelo matemático-estadístico del comportamiento del viento?, y ¿cuál es la densidad de potencia media anual disponible?

4. JUSTIFICACIÓN

El tema de investigación del presente trabajo de tesis se circunscribe dentro de la línea de investigación sobre energías renovables no fósiles de la maestría en Energía y Medio Ambiente.

El estudio se justifica con la optimización de la matriz energética del país, haciéndola menos dependiente de los combustibles fósiles. Además, pretende generar beneficios para el inversionista, así como mejorar la calidad de vida de la población.

También intentará mejorar el mapeo del recurso eólico del país y proporcionar una metodología para la evaluación de otras regiones. Por otra parte, será de utilidad en investigaciones que tengan la intención de desarrollar modelos predictivos.

5. OBJETIVOS

General

Realizar la estimación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en la finca La Concha, ubicada en la aldea El Jocotillo, Villa Canales, Guatemala.

Específicos

1. Presentar la teoría del origen del viento y su potencial.
2. Presentar el análisis estadístico de los datos de viento.
3. Analizar el método probabilístico para la determinación de la energía obtenida.
4. Analizar el impacto ambiental de la energía eólica.

6. ALCANCES

Según lo presentado con anterioridad, el nivel de energía eléctrica en la matriz energética del país únicamente alcanza el 8 %, esto lleva a pensar que muchos de los hogares guatemaltecos no cuentan con servicio de energía eléctrica, incidiendo en la calidad de vida de la población. La propuesta de uso de aerogeneradores es una opción deseable en aspectos de sostenibilidad y contribuye al desarrollo de la población aledaña al lugar de investigación.

La investigación se centra en el estudio del clima eólico del sitio propuesto, con el análisis de las variables que intervienen en la energía cinética intrínseca del viento. Por lo tanto, es una investigación de campo de acuerdo a la naturaleza de la fuente de datos y de enfoque cuantitativo por su carácter matemáticoestadístico (Piloña, 2011, p. 12). Determinar el potencial de la energía eólica del lugar, es el primer paso para decidir si es factible la generación eléctrica por medio de turbinas eólicas de forma comercial.

Con la caracterización del clima eólico del sitio, se contribuye al mapeo del recurso viento del país y se presenta una metodología para la evaluación de las variables meteorológicas que intervienen en la energía contenida en el viento, generando una fuente de información para futuras investigaciones en el campo de las energías renovables.

En el campo económico, los alcances previsibles son la contribución a una matriz energética distribuida y menos dependiente de hidrocarburos importados, también representa un nuevo campo de inversión empresarial.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. El viento: origen y su potencial

El viento es un fenómeno meteorológico que constituye una fuente de energía renovable por lo que en este apartado se analizan sus características.

7.1.1. Origen

El viento se puede definir como el movimiento de la masa de aire en la atmósfera causado principalmente por el calentamiento desigual de la superficie de la tierra debido a la radiación solar incidente que, combinada con la rotación de la tierra, crea los patrones de circulación a nivel global, regional y local.

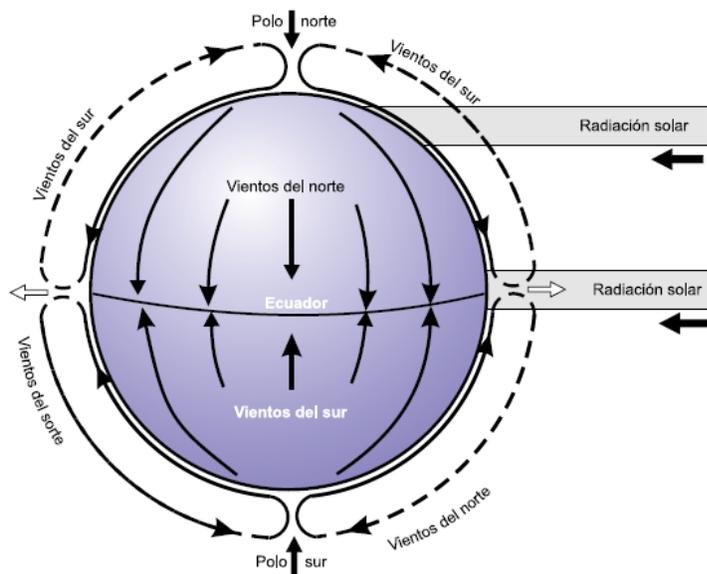
Básicamente lo que sucede es que, debido a las características topográficas tanto de las costas como de los valles y montañas, se produce un diferencial de calentamiento como consecuencia de la diferencia de ángulo de incidencia solar en el caso de las montañas y valles. En las costas la diferencia se da en la diferente en la absorción de la radiación solar entre el agua y la tierra.

Estas diferencias dan origen a distintas zonas térmicas que provocan cambios en la densidad de la masa del aire. Así, en el ecuador el aire se calienta más, por lo que su densidad es menor y forma una zona de baja presión, que hace que el aire suba a las capas más altas. El fenómeno en los polos es a la inversa ya que es aire frío, por lo tanto más denso, generando zonas de alta presión. Siguiendo la ley de los gases, el aire se mueve de las

zonas de alta presión hacia las de baja presión, es decir desde los polos hacia el ecuador, dando lugar a un ciclo de movimiento del aire en cada hemisferio.

Este sería el comportamiento del viento sin tomar en cuenta la rotación de la Tierra y asumiendo una superficie homogénea. La figura 1 muestra en forma gráfica lo que se ha descrito (Carta, 2009, p. 336).

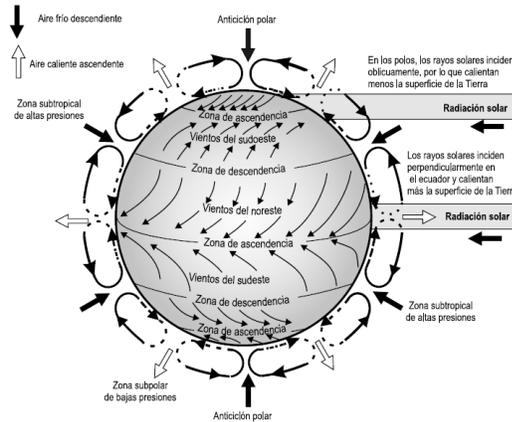
Figura 1. **Modelo básico del movimiento global del viento**



Fuente: Carta, 2009, p. 336.

Al tomar en cuenta la rotación de la Tierra, el patrón de vientos es modificado a lo que se ha llamado fuerzas de Coriolis. Estas influyen en la masa de aire en movimiento, provocando desplazamientos hacia la derecha en el hemisferio norte y en sentido contrario en el hemisferio sur, originando los vientos de poniente (oeste) y los alisios (este). Una representación gráfica de estos se muestra en la figura 2.

Figura 2. **Modelo ampliado del origen del viento**



Fuente: Carta, 2009, p. 337.

Como se puede apreciar en la figura 2, existen tres ciclos independientes en cada hemisferio. También se dan torbellinos en las zonas de interacción de los ciclos mostrados.

Hasta el momento se ha descrito un modelo simplificado de la circulación global del viento sobre el planeta, sin embargo el fenómeno es mucho más complejo ya que intervienen diferentes factores, de los cuales los más importantes son:

- La interacción entre los océanos y los continentes, ya que tienen valores de calor específicos diferentes (esto es la capacidad de la materia de almacenar calor por unidad de masa).
- El movimiento de traslación de la Tierra alrededor de Sol, haciendo que, según la estación, varíe la insolación en diferentes partes de la superficie terrestre.

- La topografía de los continentes modifica la trayectoria de los vientos según los obstáculos.
- Las perturbaciones atmosféricas.

Según el fenómeno que de origen al viento, estos se pueden clasificar como macroclimáticos, los producidos por fenómenos a nivel global y microclimáticos o locales, los provenientes de la forma de la orografía. Estos últimos se dividen a su vez en vientos de inducción térmica y vientos orográficos (Carta, 2009, p. 337).

- Vientos de inducción térmica, como ejemplo de estos se hayan las brisas marinas y las corrientes valle-montaña (Carta, 2009, p. 338). Las brisas marinas tienen su origen en la diferencia de los calores específicos entre agua marina y la tierra, por lo que el índice de calentamiento o enfriamiento entre los dos genera el movimiento de las masas de aire. Durante el día, la tierra absorbe calor más rápidamente que los grandes cuerpos de agua, entonces el viento va desde el mar hacia la tierra. Por la noche, la tierra pierde calor con mayor rapidez que el agua de los océanos, por lo que el viento cambia de dirección y sopla hacia el mar. Vientos valle-montaña, el fenómeno es semejante al de las brisas marinas debido a que en las laderas se presenta un mayor o menor gradiente de calentamiento, por la orientación que posean respecto a la radiación solar incidente. Los vientos generados bajo estas condiciones soplan por la noche en dirección hacia el valle y hacia las montañas durante el día. Estas brisas presentan un ciclo diario, siendo de baja intensidad aunque pueden llegar a los 13 m/s (Carta, 2009, p. 339).
- Vientos inducidos por la orografía el viento al desplazarse sobre la superficie se encuentra con obstáculos que modifican su trayectoria y/o

aumentan su velocidad, respondiendo al teorema de Bernulli. Ejemplo de esto son los cañones, por los que el viento aumenta su velocidad. (Carta, 2009, p. 339).

Por lo tanto, el régimen de vientos presentes en una región o zona, es directamente influenciado por las condiciones siguientes:

- Situación geográfica
- Climatología local
- Topografía del sitio
- Irregularidades del terreno

7.1.2. Potencial del viento

“Solo el 2 % de la energía solar que llega a la Tierra se transforma en energía eólica. En teoría se estima que a nivel global los vientos contienen 5×10^5 kWh de energía sin embargo solo una pequeña parte puede ser aprovechada” (Carta, 2009, p. 341).

El desplazamiento de las masas de aire originadas por el cambio de temperatura, adquieren energía por su movimiento, que se describe por la ecuación de energía cinética. Partiendo de ella es posible establecer el potencial eólico,

Ecuación 1

$$E_C = \frac{1}{2} m V^2$$

Donde:

E_c : energía cinética expresada en joules por segundo

m : flujo de aire en kilogramos por segundo

V : velocidad del viento en metros por segundo

Asumiendo un área de captación perpendicular al flujo del viento A (área barrida por las palas) el flujo de aire M es:

Ecuación 2

$$M = \rho A V$$

Donde:

A : área de captación

ρ : densidad de aire en kilogramos por metro cúbico

V : Velocidad del aire en metros por segundo

Por lo tanto, la energía cinética teórica que puede extraerse del viento para un área de captación unitaria por unidad de tiempo, es decir, la denominada potencia meteorológica (en watts por metro cuadrado) es:

Ecuación 3

$$P_m = 1/2 \rho V^3$$

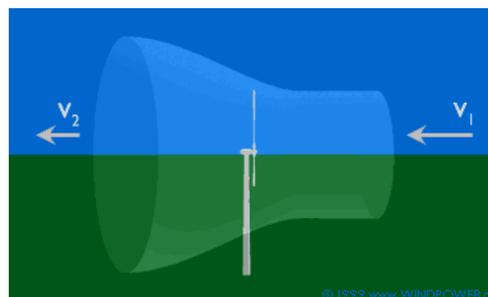
² Moragues J. R., 2003, p. 6.

7.1.3. Límite de Betz

Asumiendo que el área de captación es el área barrida por las palas de un rotor, la velocidad del viento, luego de traspasar esta área, no es nula, por lo tanto la expresión de P_m no es totalmente aprovechable.

Ya que la turbina extrae energía del viento, la velocidad de esta por detrás del rotor, será menor que la del viento corriente arriba. Es Albert Betz, en 1926, quien desarrolla la teoría de los rotores y llega a establecer los principios que rigen la energía eólica.

Figura 3. Comportamiento del viento a través de un rotor



Fuente: UCLM, 2011, p. 24.

Betz asume:

- Un rotor ideal, es decir, que no tiene pérdidas.
- Una velocidad constante del viento, el aire es incompresible y exento de fricción.
- Las aspas del rotor no perturban el flujo del viento, esto implica que el flujo laminar no es perturbado y que la presión estática a barlovento y

sotavento son iguales. Por lo tanto, se asume un rotor que extrae energía del viento sin perturbar su corriente ideal.

- Una superficie barrida por las hélices del rotor.

La relación de velocidad es:

V_1 : velocidad del viento delante del rotor

v' : velocidad del viento a la altura del rotor

v_2 : velocidad detrás del rotor

Ecuación 4³

$$v_2 < v' < v_1$$

donde $v' = (V_1 + v_2)/2$

Betz denomina a la relación $\alpha = v'/V_1$, como el factor de ralentización del aire a la altura del rotor.

Por lo tanto, se llega a la expresión:

Ecuación 5⁴

$$P_{\text{util}} = C_{\text{Betz}}(1/2)\rho AV_1^3$$

³ Fuente: UCLM, 2011, p. 24.

⁴ Fuente: UCLM, 2011, p. 25.

Donde C_{Betz} (coeficiente de Betz) es 16/27.

Por lo tanto, el coeficiente de potencia máximo (ideal) de una turbina eólica es:

Ecuación 6⁵

$$P_{\text{util}} = 0.59 (1/2) \rho A V_1^3$$

Ya que Betz asume un rotor ideal, se consideran únicamente las variables: densidad del aire, superficie del rotor y velocidad del viento. Por lo que la ecuación para la potencia teórica extraída o límite de Betz muestra que la potencia se incrementa con el cuadrado del diámetro del rotor y con el cubo de la velocidad del viento. Siendo así, al duplicar el diámetro del rotor, la potencia se incrementa cuatro veces. Por otra parte, si es la velocidad del viento la que se duplica, la potencia se multiplica por ocho. Debido a esta relación, es deseable buscar los lugares donde los vientos presentan mayores velocidades.

7.1.4. Medición del viento

Siendo la velocidad un vector, se puede expresar la velocidad del viento como una magnitud, una dirección y un sentido, expresados en m/s y grados sexagesimales, tomando el 0° marcando el norte (rosa de los vientos).

Para la medición de la magnitud del viento, se hace uso de los instrumentos denominadas anemómetros, cuyos sensores miden el flujo del aire. Se pueden clasificar en tres categorías:

⁵ Fuente: UCLM, 2011, p. 26.

- Anemómetros de rotación: son los que hacen uso de una pequeña turbina, la cual puede presentarse como hélice, cazoleta o canelón.
- Anemómetros de presión: estos miden la fuerza ejercida por el viento sobre un área conocida, ejemplos de estos son: el anemómetro de Dines, y el anemómetro de Best Romani.
- Otros: hacen uso de diferentes fenómenos físicos medibles, tales como el anemómetros de hilo caliente, los de efecto sónico, anemómetros láser, anemómetros SODAR de efecto Doppler, anemómetros de ultrasonidos.

La veleta es el instrumento que mide la dirección del viento, con el cual se completa la información vectorial del mismo.

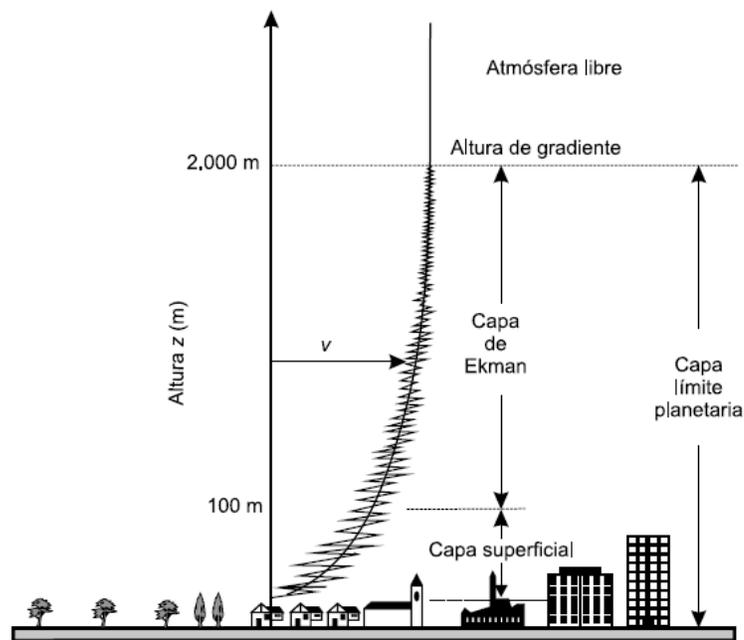
7.1.5. Variación del viento con la altura

La altura representa un factor relevante en la explotación del recurso eólico, ya que la velocidad del viento se incrementa a mayor altitud. Este fenómeno se debe a que la masa de aire se comporta como un fluido laminar, por lo que la fricción actúa desde una altura tal, que el aire fluye sin perturbación hasta la superficie terrestre en la que la velocidad decrece a un valor cero. Al rango en el que se da este cambio se le llama altura de gradiente y es típicamente de 2 000 m sobre el nivel del suelo.

Por encima de la altura de gradiente el viento únicamente es influenciado por los cambios de presión y la latitud. Por debajo de esta altura, el viento se comporta como un fluido laminar, siendo la capa de Ekman, entre los 100 - 2 000 m, y la capa límite superficial, entre el suelo y los 100 m. Estas capas son de interés para el diseño y aprovechamiento del viento, como se

muestra en la figura 8. Las turbinas eólicas quedan instaladas dentro de la capa superficial.

Figura 4. **Variación del viento con la altura**



Fuente: Carta, 2009, p. 351.

Para evaluar el recurso eólico, es ideal contar con registros del viento a la altura del rotor que se instalará. Sin embargo, para hacer estimaciones preliminares, es posible usar registros de viento a otras alturas y realizar una extrapolación hasta la altura deseada del rotor. Dos modelos matemáticos son los usados con frecuencia para evaluar el perfil vertical de la velocidad del viento, asumiendo que el terreno es plano y homogéneo:

- La ley logarítmica, la cual se deduce de los principios de mecánica de fluidos, en combinación con relaciones procedentes de las

investigaciones atmosféricas. Tiene la cualidad de ser válida en un amplio rango de altitudes. Está dada por la ecuación 16, donde V y V_0 , son las velocidades a las alturas H y H_0 , y Z_0 es la rugosidad del terreno.

Ecuación 16

$$V = V_0 [\ln (H_0/z_0)/\ln (H/z_0)]$$

- La ley potencial es empírica y es válida únicamente a bajas alturas. Sin embargo, por su simplicidad es ampliamente utilizada. Está dada por la ecuación 17, donde β representa el rozamiento del viento en la superficie.

Ecuación 17

$$V = V_0(H/H_0)^\beta$$

En la tabla I se indican valores de β y Z_0 en función de diversas rugosidades.

Tabla I. **Valores de β y z_0 para diferentes terrenos**

| Tipo terreno | β | z_0 (m) |
|--|-----------|------------|
| Liso (mar, arena, nieve) | 0,10-0,13 | 0,001-0,02 |
| Moderadamente rugoso (hierba, campos cereales, regiones rurales) | 0,13-0,20 | 0,02-03 |
| Rugoso (bosques, barrios) | 0,20-0,27 | 0,3-0,2 |
| Muy rugoso (ciudades, altos edificios) | 0,27-0,40 | 2-10 |

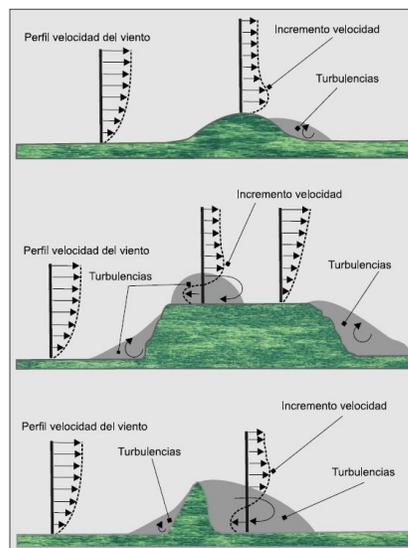
Fuente: Carta, 2009, p. 352.

La orografía del terreno influye en la magnitud del viento, por lo que el perfil vertical puede cambiar significativamente según el tipo de terreno, a esto es a lo que se denomina rugosidad.

Como se puede apreciar en la figura 9, la velocidad del viento se ve afectada de forma positiva o negativa pudiendo dar origen a turbulencias y cambios de dirección del viento. Las turbulencias son de interés en el diseño de las palas, ya que pueden causar fatiga en los materiales utilizados. Topográficamente, los accidentes que favorecen el incremento en la velocidad del viento son los perfiles redondeados con pendientes suaves.

“Los perfiles desfavorables corresponden a relieves abruptos con pendientes mayores de 30°” (Carta, 2009, p. 353). Estos perfiles generan turbulencias que dañan a los aerogeneradores y los hacen ineficientes.

Figura 5. **Comportamiento del viento ante los obstáculos**



Fuente: Carta, 2009, p. 353.

7.1.6. Densidad del aire

Retomando la ecuación 6, se puede apreciar que hasta el momento se ha analizado el componente que corresponde a la velocidad del viento, que por ser el factor que está al cubo, es el que predomina en esta expresión.

El otro factor que está involucrado en la expresión de potencia del viento es la densidad del aire ρ , la cual interviene en forma proporcional. Las variables que intervienen en la densidad del aire son: la temperatura, la altura y la humedad contenida el aire, por lo que para su cálculo se realizan mediciones de temperatura ambiente, presión barométrica y la humedad relativa.

Para el cálculo de la densidad del aire se hace uso de la fórmula propuesta por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM, 2015, p. 3), la cual toma en cuenta las siguientes variables:

Ecuación 14

$$\rho_a = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$

Donde

- ρ_a : densidad del aire, kg m⁻³
- p : presión atmosférica, Pa
- T : temperatura termodinámica del aire, K
- M_a : masa molar del aire seco, kg mol⁻¹
- M_v : masa molar del agua, kg mol⁻¹
- R : constante molar de los gases, J mol⁻¹K⁻¹
- Z : factor de compresibilidad
- x_v : fracción molar del vapor de agua

6

⁶ Peña, 2010, p. 3.

Sin embargo, para la mayoría de propósitos prácticos, es suficientemente precisa la fórmula simplificada siguiente:

Ecuación 15 ⁷

$$\rho_a = \frac{0.34848p - 0.009h_r \exp(0.061t)}{273.15 + t}$$

Donde:

ρ_a : densidad del aire en kg m⁻³
 p : presión barométrica en hPa
 h_r : humedad relativa del aire en %
 t : temperatura del aire en °C

7.2. Análisis estadístico del clima eólico

Se denomina clima eólico a las características que presenta el viento en determinado punto de medición. Para llevar a cabo dicha descripción, es necesario analizar los datos obtenidos a partir de los instrumentos y agruparlos de forma que proporcionen información útil. Para ello, se tratan los datos de dos maneras: una de forma temporal y otra de forma de distribución de frecuencias, atendiendo a la característica aleatoria que presenta el viento (Franquesa, 2009, p. 142).

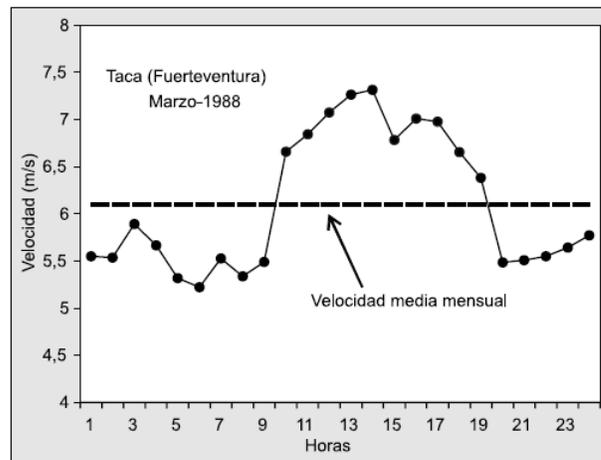
7.2.1. Distribuciones temporales

Este análisis sigue la secuencia a lo largo del tiempo de los datos registrados de la velocidad y dirección del viento y proporciona información para dar respuesta a las siguientes preguntas:

⁷ Peña, 2010, p. 3.

- ¿Cuál es comportamiento diario del viento en un período dado? En la figura 4 se presentan los valores promedio horario para un período determinado. Se puede apreciar la fluctuación de la velocidad del viento a lo largo del día, durante un período de tiempo dado, (semanal, mensual, trimestral, entre otros), además se muestra el valor de la media mensual.

Figura 6. **Registro diario de la velocidad del viento**



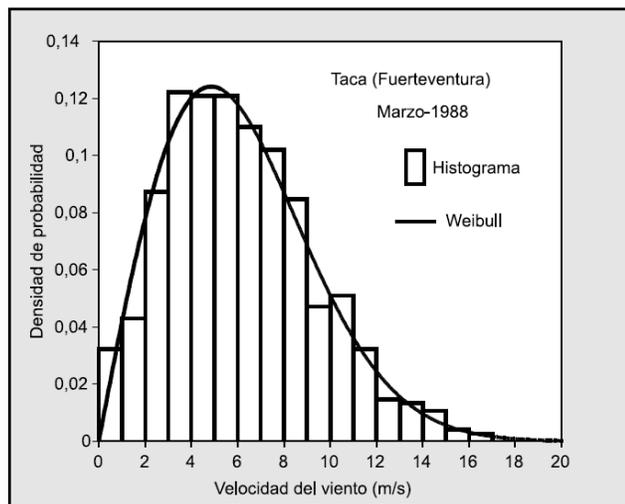
Fuente: Carta, 2009, p. 346.

- ¿Cuál es el comportamiento de la velocidad media mensual a lo largo de un año?
- ¿Cómo es el comportamiento de la velocidad del viento en forma interanual?

7.2.2. Distribuciones de frecuencia

Este análisis es de carácter estadístico y proporciona información acerca del comportamiento del viento en función de la ocurrencia de intervalos de velocidad del viento. Para obtener estas distribuciones de frecuencias, se divide el rango de velocidades posibles en un número de intervalos, usualmente con anchos de 1 m/s. Con este tratamiento de los datos, se obtiene una distribución de frecuencias relativas o el porcentaje de ocurrencia de cada intervalo, con lo que se obtiene una gráfica de densidad de probabilidad como de la figura 5.

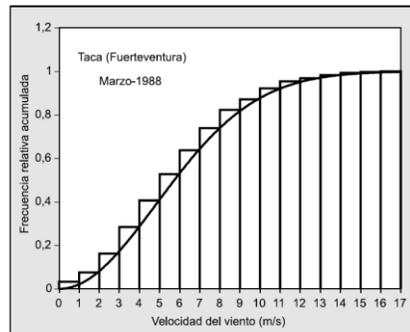
Figura 7. Densidad de probabilidad teórica y experimental



Fuente: Carta, 2009, p. 348.

También es importante conocer la frecuencia con la cual la velocidad del viento presenta valores inferiores a una velocidad del viento dada; lo cual se puede representar en un histograma de frecuencias acumuladas como el que se muestra en la figura 6.

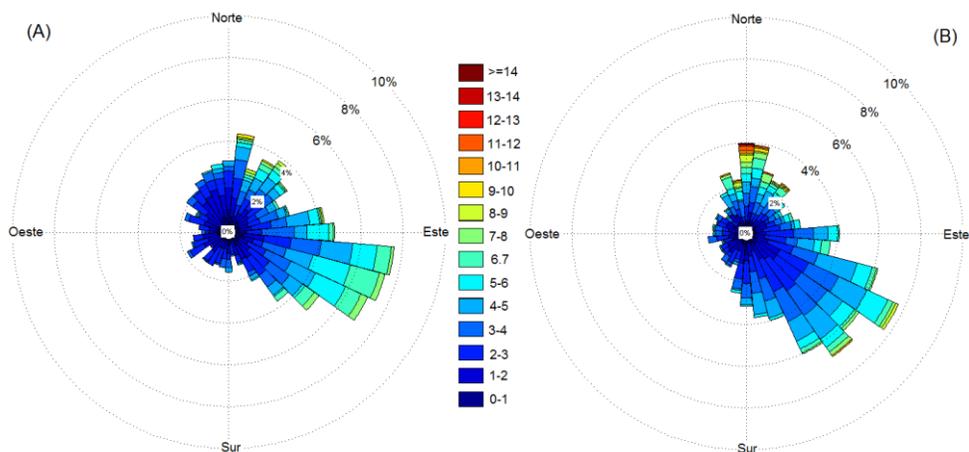
Figura 8. Frecuencia acumulada teórica y experimental



Fuente: Carta, 2009, p. 349.

Otro tipo de representación es la rosa de los vientos, la cual toma la distribución de frecuencias, la dirección del viento y su graficación en un diagrama de coordenadas polares. La figura 7 muestra un ejemplo de esta representación.

Figura 9. Rosa de los vientos



Fuente: Carrasco, 2012, p. 35.

7.2.3. Función de Weibull

Debido a que el comportamiento del viento es el de un evento de tipo aleatorio, se hace necesario realizar un análisis de tipo estadístico, para lo cual, es de gran utilidad hacer uso de las funciones de probabilidad continuas que logren ajustarse a los datos obtenidos de forma experimental, como el caso de la figura 5.

Dentro de estas funciones de probabilidad, las más conocidas son: la distribución normal, la de Gumbel, la de Log-Normal, exponencial y la de Weibull.

La distribución de Weibull (ecuación 7) describe eventos que se presentan usualmente en la producción industrial (Martínez, 2011, p. 2), bosques nativos (Návar-Cháidez, 2009, p. 52) y vulcanología; es la más apropiada para realizar los modelos del comportamiento del viento (Cadenas E., 2008). Se dice que es la más apropiada ya que presenta dos parámetros, lo cual da versatilidad y facilita la obtención de los coeficientes, también permite la comparación de modelos de diferentes lugares.

Esta representación matemática tiene la ventaja de ser general, “trata de reflejar no el comportamiento de una muestra concreta, sino la estructura de distribución de los valores de la variable a largo plazo” (Carta, 2009, p. 350); también su uso es muy práctico, permitiendo obtener probabilidades de cualquier suceso.

Ecuación 7

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

Los parámetros de la ecuación 7 k y c son, el parámetro de forma, k , que es adimensional y c , el parámetro de escala (que tiene las mismas unidades de velocidad).

Para la determinación de los parámetros k y c es posible utilizar, entre otros, los siguientes métodos:

- Máxima probabilidad (MP)
- Máxima probabilidad modificada (MPM)
- Método de momentos (MM)
- Mínimos cuadrados

El método de momentos es el que presenta mayor efectividad para determinar los parámetros de forma y escala, aunque los demás métodos tienen un desempeño estadístico similar (Serrano, 2013, p. 315).

Los datos estadísticos de media y desviación estándar para la distribución de Weibull son dados por las ecuaciones 8, en la que Γ es la función gamma de Euler.

⁸ Carta, 2009, p. 350.

Ecuaciones 8

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

$$\sigma = c\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{1/2}$$

9

La expresión para la función de distribución acumulativa $F(v)$ de una variable aleatoria continua V (figura 6), y para la distribución de Weibull de dos parámetros es:

Ecuación 9

$$F(v) = P(V \leq v) = 1 - \exp\left[-\frac{v}{c}\right]^k$$

10

Esta representa la probabilidad de que V tome valores menores o iguales a un valor v específico.

La probabilidad que la velocidad del viento sea superior a un valor dado es:

⁹ Carta, 2009, p. 350.

¹⁰ *Ibíd.*

Ecuación 10

$$P(V \geq v) = \exp \left[-\frac{v}{c} \right]^k$$

11

La expresión para la probabilidad de la velocidad del viento se encuentre dentro del rango de valores V_x y V_y es:

Ecuación 11

$$P(v_x \leq V \leq v_y) = \exp \left[-\frac{v_x}{c} \right]^k - \exp \left[-\frac{v_y}{c} \right]^k$$

12

Haciendo uso del método de momentos para la estimación de k y c se iguala la media y la desviación típica con los correspondientes valores de la distribución de Weibull. De esta forma se obtiene:

Ecuación 12

$$k = \left(\frac{s}{\bar{V}} \right)^{-1.086} ; c = \frac{\bar{V}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)}$$

13

En la que V_{media} y la desviación estándar(s), están dadas por:

¹¹ Carta, 2009, p. 350.

¹² *Ibíd.*

¹³ *Ibíd.*

Ecuación 13

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad ; \quad s = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{V})^2 \right]^{1/2}$$

14

7.3. Método probabilístico para determinar la energía obtenida

Haciendo uso de la densidad de probabilidad del viento (Weibull) $f(v)$, y la curva característica del aerogenerador $P(v)$, se obtiene una curva de probabilidad de potencia, cuya integral (ecuación 18) tiene como límites la velocidad de arranque y la velocidad de parada, dando como resultado la potencia media estimada para el período considerado.

Ecuación 18

$$P = \int_{V_a}^{V_p} P(v) f(v) dv$$

15

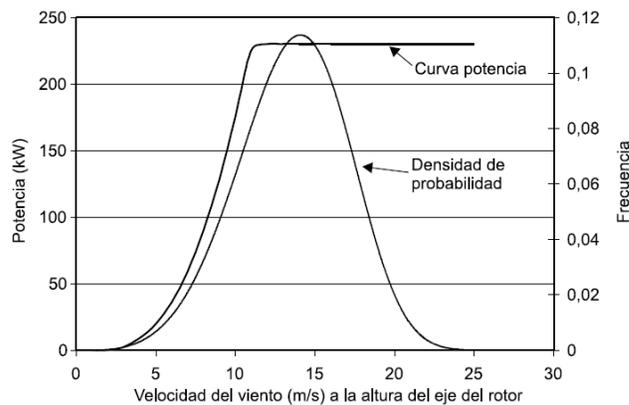
Es usual que los fabricantes de aerogeneradores presenten las curvas características en forma discreta (N puntos) por lo que se puede usar la ecuación 19, como aproximación a la ecuación 18. Dicha aproximación consiste en suponer lineal la variación entre dos puntos de la curva de potencia-velocidad.

¹⁴ Carta, 2009, p. 351.

¹⁵ Carta, 2009, p. 390.

La ventaja de este método es su simplicidad, pudiéndose usar para analizar la sensibilidad a los parámetros de interés, como las velocidades características de las turbinas.

Figura 10. **Curva de potencia y densidad de probabilidad del viento**



Fuente: Carta, 2009, p. 391.

Si se analiza el intervalo entre los dos puntos i e $i + 1$, la potencia en función de la velocidad es dada por:

Ecuación 19

$$P(v) = \frac{P_{i+1} - P_i}{v_{i+1} - v_i} (v - v_i) + P_i$$

Luego, sustituyendo en la ecuación 18, se obtiene la potencia media:

¹⁶ Carta, 2009, p. 391.

Ecuación 20

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \int_{v_i}^{v_{i+1}} f(v) \left[\frac{P_{i+1} - P_i}{v_{i+1} - v_i} (v - v_i) + P_i \right] dv \right\} \quad 17$$

La estimación de la energía producida se realiza mediante la ecuación 21, donde T es el período de tiempo considerado.

Ecuación 21

$$\bar{E} = T\bar{P} \quad 18$$

Este método permite estimar el factor de capacidad, CF. “Es decir, el porcentaje de tiempo que una turbina tendría que haber estado funcionando a la potencia nominal P_n para producir la misma cantidad de energía en el período de tiempo considerado. Dicho factor se determina en este método mediante la ecuación” (Carta, 2009, p. 391).

Ecuación 22

$$CF = \left(\frac{\bar{P}}{P_n} \right) 100 \quad 19$$

También pueden estimarse las denominadas horas equivalentes o tiempo equivalente t_e , es decir el número de horas en operación de forma continua de

¹⁷ Carta, 2009, p. 391.

¹⁸ *Ibíd.*

¹⁹ *Ibíd.*

la turbina con potencia nominal P_n , para producir la misma cantidad de energía en un período de tiempo dado.

Ecuación 23

$$t_e = \left(\frac{\bar{E}}{P_n} \right)^{20}$$

7.4. Impacto ambiental de la energía eólica

El impacto ambiental del uso de la energía del viento se debe analizar desde dos puntos de vista:

- La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- El cambio en el paisaje y su alteración por el impacto sobre las aves, el ruido y erosión.

El impacto sobre el paisaje es muy subjetivo y puede minimizarse al realizar un diseño atractivo.

El ruido generado es inevitable y disminuye con el cuadrado de la distancia, en un momento dado es más importante el mismo ruido del viento.

El impacto por erosión se da en la fase de construcción del proyecto, al realizar los caminos de acceso y la cimentación de las torres, después de lo cual es posible recuperar la vegetación con un adecuado plan de mitigación de impactos. En la fase de operación la erosión es prácticamente nula.

²⁰ Carta, 2009, p. 392.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. EL VIENTO: ORIGEN Y SU POTENCIAL

1.1. Origen

1.2. Potencia del viento

1.3. Límite de Betz

1.4. Medición del Viento

1.5. Variación del viento con la altura

1.6. Densidad del aire

2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE VIENTO

2.1. Distribución temporal

2.2. Distribución de frecuencias

2.3. Función de Weibull

3. MÉTODO PROBABILÍSTICO PARA DETERMINAR LA ENERGÍA OBTENIDA

4. IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA EÓLICA

5. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA FINCA LA CONCHA, VILLA CANALES, GUATEMALA: DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

El tipo de estudio se enmarca en una investigación de tipo cuantitativo descriptivo experimental. Es cuantitativo ya que hace énfasis en la recolección, ordenamiento, sumarización y análisis estadístico de datos; es descriptivo porque caracteriza el clima eólico del sitio y es experimental por la naturaleza de los datos recabados. Debido a lo anterior, se plantea la hipótesis que es susceptible de ser comprobada o no con base en los cálculos estadísticos propuestos.

9.1. Etapa 1: investigación preliminar

En esta etapa se investiga el recurso eólico a nivel teórico y se describen las características físicas del emplazamiento.

9.1.1. Investigación bibliográfica

Se recaba y estudia la información pertinente para el conocimiento teórico del recurso viento.

9.1.2. Reconocimiento del emplazamiento

Se realizará una visita de reconocimiento como paso inicial a la determinación del potencial eólico en el lugar, ya que con una inspección visual es posible evaluar empíricamente la inclinación de la vegetación y, por ende, la magnitud de los vientos en el emplazamiento.

9.1.3. Caracterización del sitio de estudio

Se recabará información general de la ubicación y características generales del sitio de estudio. Incluyendo altitud sobre el nivel del mar y coordenadas geográficas.

9.2. Etapa 2: recolección de datos

Los datos son obtenidos en el emplazamiento por medio de una torre con los anemómetros a 80 m. de altura.

9.2.1. Definición de variables, equipo y unidades de medición

Las variables que se usarán durante el estudio son las que están involucradas en la ecuación 3, de potencia del viento y la ecuación 14 de densidad de aire.

$$P_m = 1/2 \rho V^3$$
$$\rho_a = \frac{0.34848p - 0.009h_r \exp(0.061t)}{273.15 + t}$$

Con lo cual, se presenta en la siguiente tabla, cada una de las variables, el equipo de medición y las unidades de medida. Adicionalmente se tomará la variable “dirección del viento”.

Tabla II. **Variables a registrar**

| Variable | Equipo meteorológico | Unidad de medida |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| V Velocidad del viento | 2 anemómetros ubicados a 80 msns* | Metros por segundo (m/s) |
| t Temperatura ambiente | 1 termómetro a 15 msns | Grados Celsius (°C) |
| h_r Humedad relativa | 1 higrómetro a 15 msns | Porcentaje (%) |
| p Presión barométrica | 1 barómetro a 15 msns | Hectopascales (hPa) |
| Dirección del viento | 1 veleta a 15 msns | Grados de rosa de los vientos |
| | Registro digital de datos (<i>data logger</i>) | Formato RWD |

*metros sobre el nivel del suelo

Fuente: elaboración propia.

9.2.2. Procedimiento de toma de datos

- Recolección de forma mensual, a través de la conexión de una computadora portátil al *data logger*.
- La información del *data logger* es entregada en forma de formato RWD (*raw data wind*), por lo que se convierte a formato de hoja electrónica por medio del programa NRG Symphonie Data Retriever.
- Luego, con la información obtenida, se generará la tabla siguiente:

Tabla III. **Formato para ingresar los datos de la torre 80 m, La Concha**

| Fecha | Hora | Anemómetro No.1 (80 m) (m/s) | Anemómetro No.2 (80 m) (m/s) | Veleta (°) | Termómetro (15 m) | Barómetro (15 m) | h _r (15 m) |
|-------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

9.3. **Etapa 3: análisis estadístico**

Debido al carácter aleatorio de las variables a medir, se hará uso de las herramientas de la estadística descriptiva, con el objetivo de establecer las características del viento en el emplazamiento.

9.3.1. **Ordenamiento y graficación de datos**

Los datos obtenidos de las variables medidas se ordenarán y serán tratados con las herramientas de la estadística descriptiva para establecer los patrones de comportamiento del viento.

9.3.2. **Datos del viento**

- Velocidad del viento

Tabla IV. **Formato para ingresar la estadística mensual de velocidad del viento (metros por segundo)**

| Año, mes | Media | Desviación estándar | Mediana | Moda |
|-----------------------|--------------|----------------------------|----------------|-------------|
| | | | | |
| | | | | |
| Datos globales | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Con la información de la tabla anterior se generará la gráfica, meses vs velocidad del viento.

- Distribución de frecuencias de velocidad de viento

Tabla V. **Formato para ingresar la distribución de frecuencias de velocidad de viento**

| Intervalo (m/s) | Num. de datos | Frecuencia relativa (%) |
|------------------------|----------------------|--------------------------------|
| 0-1,0 | | |
| 1,1-2,0 | | |
| 2,1-3,0 | | |
| 3,1-4,0 | | |
| ... | | |
| 24,1-25,0 | | |
| Total | | 100,0 % |

Fuente: elaboración propia.

Con la información de la tabla 5 se generarán las gráficas de frecuencias relativas acumuladas, de intervalos *versus* frecuencia acumulada, las curvas de frecuencias relativas e intervalos *versus* frecuencia relativa.

9.3.3. Datos de dirección del viento

- Dirección del viento

Tabla VI. **Formato para ingresar la dirección del viento (grados rosa de los vientos)**

| Año, mes | Media | Desviación Estándar |
|-----------------------|-------|---------------------|
| | | |
| | | |
| Datos globales | | |

Fuente: elaboración propia.

- Distribución de frecuencia de la dirección del viento

Tabla VII. **Formato para ingresar la distribución de frecuencia de dirección del viento**

| Intervalo (°) | Núm. de datos | Frecuencia Relativa (%) |
|---------------|---------------|-------------------------|
| 0-30 | | |
| 31-60 | | |
| ... | | |
| 331-360 | | |

Fuente: elaboración propia.

A partir de esta información se realizará la gráfica de grados *versus* frecuencia relativa

9.3.4. Densidad del aire

Se hace uso de la ecuación 14, densidad del aire.

Tabla VIII. **Formato para ingresar la densidad del aire mensual**

| Año, mes | Temperatura media (°C) | Presión atmosférica media (hPa) | Humedad relativa media (%) | Densidad media del aire (kg/m³) |
|-----------------------|-------------------------------|--|-----------------------------------|---|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| Datos globales | | | | |

Fuente: elaboración propia.

9.3.5. Densidad de potencia meteorológica

Se hace uso de la ecuación 3 potencia del viento.

Tabla IX. **Formato para ingresar la densidad de potencia meteorológica**

| Año, mes | Velocidad Viento media (m/s) | Densidad del aire media (kg/m³) | Densidad de potencia media (W/m²) |
|-----------------------|--------------------------------------|--|--|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| Datos globales | | | |

Fuente: elaboración propia.

A partir de esta información se realizará la gráfica de grafica de meses *versus* densidad de potencia media.

9.3.6. Perfil vertical de la velocidad del viento

Haciendo uso de la ecuación 17 y de la tabla 1, se establece el perfil vertical del viento.

Tabla X. **Formato para ingresar el perfil vertical de la velocidad del viento**

| Altura H (msns) | Rugosidad del terreno | Velocidad del viento media anual (m/s) | Velocidad del viento, calculada a la altura H |
|------------------|-----------------------|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Fuente: elaboración propia.

A partir de esta información se realizará la gráfica de H *versus* velocidad del viento.

9.4. Etapa 4: generación del modelo estocástico

A partir de los datos obtenidos es posible generar una función de probabilidad que permitirá generalizar el comportamiento del viento en el sitio.

9.4.1. Cálculo de los parámetros de la función de Weibull

A partir de la ecuación 12, la información de velocidad media y desviación estándar de velocidad del viento, y de las tablas para la función gamma, se calculan los parámetros k y c de la distribución de Weibull.

Tabla XI. Formato para ingresar los parámetros k y c de Weibull

| Año, mes | Velocidad media (m/s) | Desviación estándar | Valor función gamma | Parámetro k | Parámetro c |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Datos globales | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

9.4.2. Generación de la curva de Weibull

Con los parámetros k y c , se procede a hacer uso de la función Weibull del programa Excel de Microsoft, para la generación de gráficas de Weibull.

9.4.3. Técnicas de análisis de la información

Con base en el estudio, se busca generar un modelo cuantitativo a partir de los datos obtenidos (experimentales) que describirán el comportamiento del viento en el sitio y por ende, la densidad de potencia disponible. Se obtendrá una función de probabilidad de Weibull a partir de los datos discretos y se

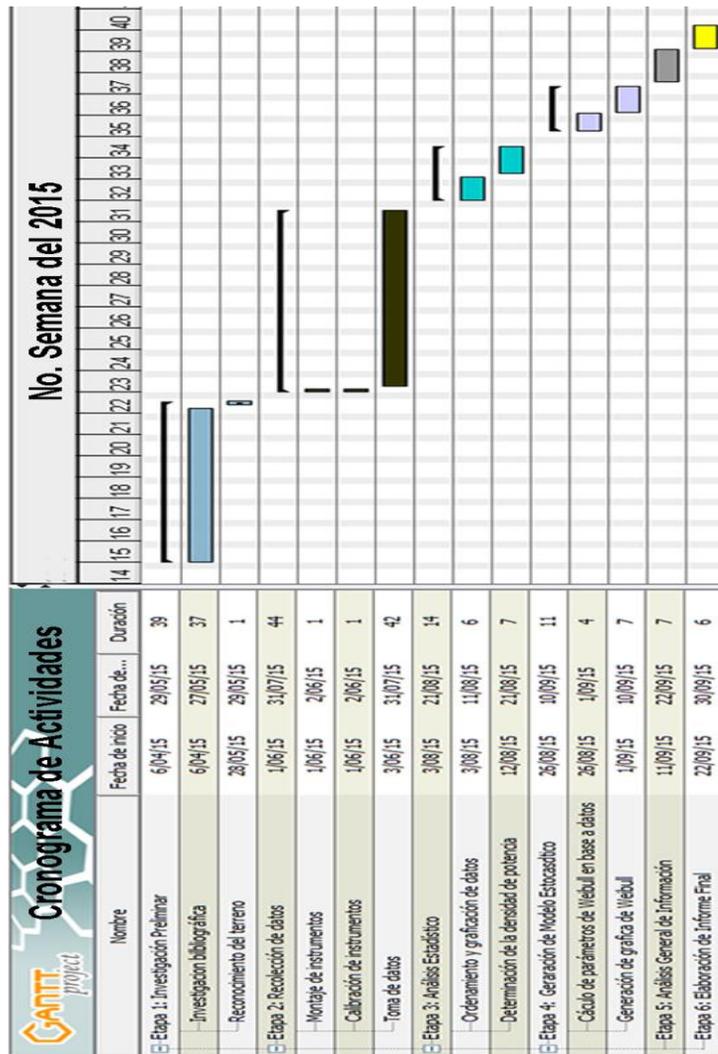
obtendrá el coeficiente de correlación entre ambos para verificar que el modelo es el adecuado.

Para el proceso de análisis, se hará uso de infostat, la cual es una herramienta informática que tiene como entrada los datos discretos de la velocidad de viento. Dentro de las opciones del programa se elige la función a la que se desea ajustar los datos, en este caso se elegirá la función Weibull, y como salida se obtienen los parámetros de la función, los estadísticos básicos, el coeficiente de correlación del ajuste a la curva elegida. Este proceso se realizará tanto para el período que se espera mucho viento como para el período de viento bajo.

10. CRONOGRAMA

Las actividades detalladas en la siguiente tabla se desarrollarán durante 40 semanas a partir del inicio de la investigación.

Tabla XII. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

11. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Se presenta el detalle de los recursos necesarios y la factibilidad económica del investigado para llevar a cabo el estudio propuesto.

11.1. Recursos humanos

El recurso humano será necesario para la instalación, mantenimiento y calibración de los instrumentos de la torre meteorológica.

11.2. Recursos materiales

El equipo físico detallado a continuación será financiado por el inversionista y el investigador se hará cargo del equipo de software y vario.

11.2.1. Equipo físico

- Torre meteorológica de 80 metros de altura
- 2 anemómetros
- Sonda de temperatura a 15 m
- Veleta a 15 m
- Barómetro a 15 m
- Medidor de humedad relativa a 15 m
- *Data logger*
- Computadora portátil

11.2.2. Equipo de software

- Programa NRG Symphonie data Retriever
- Microsoft Excel
- Programa estadístico Infostat

11.3. Equipos varios

- Vehículo
- Combustible
- Papel y artículos de oficina

11.3.1. Recursos financieros

Los ítems indicados a continuación son los presupuestados por el investigador para el desarrollo del estudio.

Tabla XIII. **Resumen de los gastos presupuestados por el investigador**

| Rubros a Financiar | Valor |
|------------------------|-------------------|
| Torre Meteorológica | Q 0,00 |
| Equipo Meteorológico | Q 0,00 |
| Computadora | Q 0,00 |
| Software | Q 0,00 |
| Materiales de oficina | Q 500,00 |
| Combustibles | Q 1 200,00 |
| Investigar (40 horas) | Q 0,00 |
| Asesor | Q 2 500,00 |
| Total | Q 4 200,00 |

Fuente: elaboración propia.

11.4. Factibilidad del estudio

Según los gastos detallados anteriormente y gracias al financiamiento por parte del inversionista, es factible para el investigador llevar a cabo el estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alonzo, A. (1 de 12 de 2013). Generación de 50 MW con energía eólica.
2. Avila, O. F. (2004). Modelo Estructural de Series de Velocidad de Viento en la Ciudad de Salta: Control estadístico de un modelo Previo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2(2).
3. Cadenas, E. (2008). Análisis Estadístico de Mediciones de la Velocidad del Viento Utilizando la Técnica de Valores Desviados. Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
4. Cadenas, E. R. (2008). Análisis estadístico de Mediciones de Velocidad del Viento Utilizando la Técnica de Valores Desviados. Querétaro: Centro Nacional de Meteorología.
5. Carrasco, M. (2012). Reconstrucción del campo de Viento para la Generación de Mapas de Potencial Eólico a lo largo de la Costa del Estado de Tamaulipas, México. Altamira: Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanza.
6. Carta, J. C. (2009). Centrales de energía Renovables. Madrid: Prentice Hall.
7. CIPM. (4 de 2 de 2015). bipm.org. Recuperado el 4 de 2 de 2015, de Bureau International des poids et mesures: www.bipm.org.

8. CNEE. (2013). Informe estadístico 2013.
9. Congreso de la República de Guatemala. (10 de noviembre de 2003). Ley de Incentivos para la el Desarrollo de Proyectosde Energía Renovable. Guatemala.
10. Faiella, L. G. (s.f.). Gestión de Variables Meteorológicas y Mapeo Eólico. Asociación Argentina de Energía Eólica.
11. Fernández, L. (2007). Modelos Avanzados para la Predicción a Corto Plazo de la Producción Eléctrica en Parques eólicos. Universidad de la Rioja, Ingeniería Eléctrica. Logroño: Unversidad de la Rioja.
12. Franquesa, M. (2009). Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas. Castelldefels.
13. Galicia, M. P. (2012). Estudio de Flujo Eólico para la producción de Energía Eoloeléctrica. Mexico, D.F.: Instituto Politécnio Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
14. Green Peace. (2012). Los escenarios de la perspectiva mundial de la energía eólica.
15. Guatemala, M. d. (2010). Informe Balance energético 2010. Guatemala.
16. Hernandez, Q. E. (febrero de 2012). Evaluación del Potencial Eólico para la Generación de Energía Eléctrica en el Estdo de Veracruz, México. Dyna, 79(171), 215-221.

17. International Energy Agency. (2008). World Energy Outlook 2008. Paris: IEA.
18. Jaime Moragues, A. R. (s.f.). Energía Eólica. Obtenido de Instituto Argentino de Energía: www.iae.org.ar/renovables/ren_eolica.pdf
19. Koberle, A. (2012). Energizar a Guatemala: propuesta de un plan de electricidad sostenible. Guatemala: El Observador.
20. Martínez, L. (2011). Métodos de Inferencia para la Distribución de Weibull: Aplicación en la Fiabilidad Industrial. Vigo, España: Universidad de Vigo.
21. Martínez, L. (2011). Métodos de Inferencia para la Distribución de Weibull: Aplicación en la Fiabilidad Industrial. Vigo, España: Universidad de Vigo.
22. Ministerio de Energía y Minas, Gobierno de Guatemala. (2013). Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2014-2023.
23. Moragues, J. R. (2003). Energía Eólica. 4. Argentina: Instituto Argentino de la Energía.
24. Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). Aspectos ambientales de la Energía eólica. Argentina.
25. Návar-Cháidez, J. (2009). Estimaciones empíricas de parámetros de la distribución Weibull en bosques nativos del norte de México. *Revista Forestal Latinoamericana*, 51.

26. Palomares, A. (2004). Caracterización del Régimen de vientos y Desarrollo de un modelo de predicción eólica a escala local en el estecho de Gibraltar. Física de la tierra, Astronomía y Astrofísica. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
27. Peña, L. B. (2010). Impacto en la nueva fórmula de la densidad del aire CIPM 2007. Querétaro: Centro Nacional de Meteorología.
28. Perez, H. (2008). Modelización Matemática para evaluar energías para sistemas eólicos e híbridos eólicos-diesel. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
29. Perfit, M. (2005). Future Power. National Geographic, 7.
30. Piloña, G. (2011). Guía práctica sobre métodos y técnicas de investigación documental y de campo. Guatemala: GP Editores.
31. Serrano, J. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. Scientia et Technica, 319.
32. Siglo XXI. (28 de 12 de 2012). Energía eólica en Guatemala.
33. Tafur, A. P. (2013). Modelación y Evaluación del Potencial Eólico como una Fuente de Generación de Energía Eléctrica en la Zona Costera de Cartagena. Cartagena: Universidad de Cartagena.
34. UCLM. (1 de 1 de 2011). Energía Eólica. España.

35. Warchomicka, N. P. (2005). Evaluación del recursos eólico del Departamento Confluencia de la Provincia del Neuquen. Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente, 9.

